

В.Н. Шут, А.В. Гаврилов, Д.А. Ильющенко, Н.С. Буйнов

Теплофизические характеристики терморезисторных блоков защиты линий электронной связи

В процессе эксплуатации системы связи подвергаются воздействию электромагнитных помех, перенапряжений и токовых перегрузок от источников промышленного и природного происхождения. Одним из факторов, представляющих наибольшую опасность, является попадание сетевого напряжения. Для защиты автоматических телефонных станций (АТС) от токовых перегрузок применяются токочувствительные элементы: плавкие предохранители, термокатушки, позисторы и PolySwich-элементы [1–3]. Позисторы (элементы с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ПТКС) на основе полупроводниковой керамики титаната бария являются перспективными элементами токовой защиты, что обусловлено высоким значением ПТКС, возможностью варьировать температурой переключения и сопротивлением образцов в широких пределах [4]. При попадании в линию связи напряжения, превышающего допустимый уровень, терморезистор разогревается и переключается в высокоомное состояние, в результате чего резко ограничивается ток цепи. После устранения причины перенапряжения защитный элемент возвращается в исходное состояние. Защита от токовых перегрузок может реализовываться как на основе дискретных позисторных элементов, так и в виде позисторных блоков. Последний вариант представляет наибольший интерес, так как в одном устройстве могут реализовываться как защитные, так и сигнальные функции, при этом надежность блока оказывается выше, чем его аналога на дискретных элементах. Для эффективного функционирования подобных устройств необходимо не только оптимизировать характеристики терморезисторов, но и прогнозировать тепловые режимы их работы.

Теоретическая модель. Конструктивно позисторный блок состоит из помещенных в цилиндрический пластмассовый корпус позисторов защиты линии, позистора-датчика, металлических контактов и изолирующих керамических дисков, находящихся в тепловом контакте (рис. 1). Защитный позистор, позистор-датчик и керамический диэлектрик имеют одинаковый диаметр 5,5 мм, а их толщины равны 1,8 мм, 1,1 мм и 0,9 мм, соответственно. Толщина контактов – 0,2 мм. Размеры блока – диаметр 10,5 мм, высота 9,7 мм. Электрические характеристики защитного позистора и позистора-датчика приведены в табл. 1, а тепловые характеристики элементов позисторного блока систематизированы в табл. 2. Для расчета электрических характеристик защитных устройств (минимальный ток срабатывания, время срабатывания и др.) необходимо знать распределение температуры в позисторном блоке. С этой целью было проведено совместное решение уравнений теплопроводности и электропроводности методом конечных элементов с использованием среды моделирования FEMLAB.

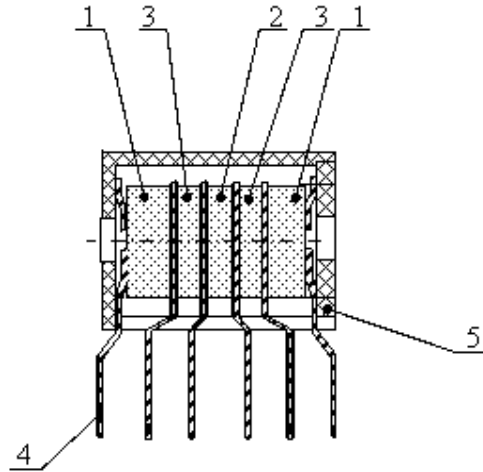


Рис. 1. Блок защиты АТС (1 – защитные позисторы, 2 – позистор-датчик, 3 – электроизолирующие диски, 4 – контакты, 5 – корпус блока).

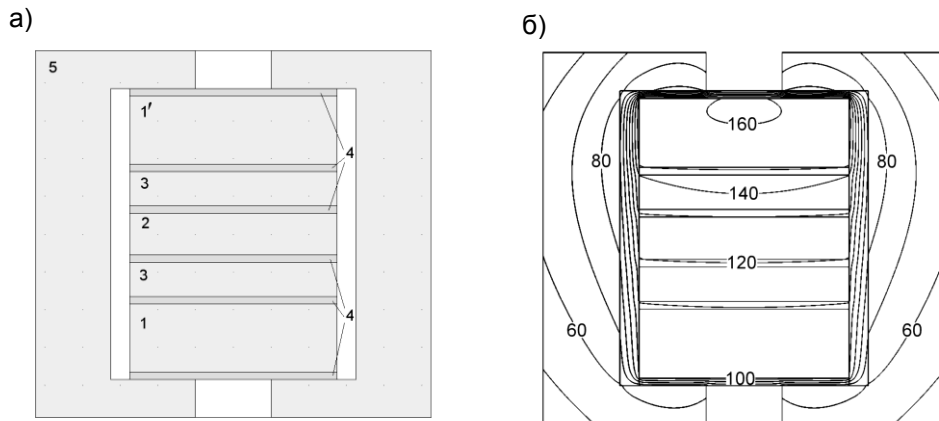


Рис. 2. Упрощенная схема позисторного блока защиты, используемая при моделировании (а) [1', 1 – защитные позисторы, 2 – позистор-датчик, 3 – электроизолирующие диски, 4 – контакты, 5 – корпус блока] и распределение температуры в блоке через время $t = 300$ с после подачи 220 В на один защитный позистор (б).

Таблица 1
Электрические характеристики позисторных элементов

	$T_c, ^\circ\text{C}$	$\rho_{25}, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$\alpha, \%/K$	$R_{\text{max}}/R_{\text{min}}$	$U_{\text{пр}}, \text{В/мм}$
Датчик	70	8	19	$1.2 \cdot 10^6$	255
Защитный позистор	90	0.37	14	$3 \cdot 10^5$	240

Таблица 2

Тепловые характеристики элементов позисторного блока

Элемент блока	Теплопроводность Вт/(м·К)	Теплоемкость Дж/(кг·К)	Плотность кг/м ³
Защитный позистор	2,3	600	5600
Позистор-датчик	2,3	600	5600
Электроизолирующие диски (электрофарфор)	3,0	850	3200
Контакты (сталь)	40	440	7900
Контакты между позис- тором и изолятором	0,43*	440	7900
Контакты между позис- тором и корпусом	0,0158*	440	7900
Корпус	0,27	2300	1100

* Эффективное значение.

Расчеты выполнялись с использованием упрощенной конструкции позисторного блока, в которой не учитывается тепловой поток выводов (рис. 2а). Данное допущение позволяет ограничиться двумерным случаем с осевой симметрией (в координатах z и r с началом координат в центре блока).

Уравнение электропроводности решалось для одного защитного позистора (область 1' на рис. 2), к которому приложено напряжение $U = 220\text{В}$ (случай попадания в линию связи сетевого напряжения). Задавались следующие граничные условия для потенциала φ на электродах и боковой поверхности терморезистора:

для первого электрода:

$$\varphi = 0, \quad (1)$$

для второго электрода:

$$\varphi = U, \quad (2)$$

для изолированной боковой поверхности:

$$\vec{n} \cdot \text{grad}(\varphi) = 0, \quad (3)$$

где \vec{n} – единичный вектор нормали к поверхности.

Граничные условия при решении задачи теплопроводности задавались исходя из закона Ньютона (граничные условия 3-го рода):

$$\lambda \vec{n} \cdot \text{grad}(T) + \sigma(T - T_0) = 0, \quad (4)$$

где \vec{n} – единичный вектор нормали к поверхности; T_0 – температура окружающей среды.

Граничные условия (1)–(4) необходимо дополнить начальными условиями:

$$T(r, z, 0) = T_0, \quad (5)$$

$$\varphi(r, z, 0) = U \frac{z}{L}. \quad (6)$$

Для корректного решения данной задачи необходимо учитывать термическое контактное сопротивление между керамикой и металличе-

скими выводами. Прижимной тепловой контакт между керамикой и электродами можно считать идеальным, заменив теплопроводность металлических электродов (λ) на более низкую величину (λ^*), учитывающую контактное тепловое сопротивление соприкасающихся поверхностей. Такой подход допустим, поскольку радиальные (перпендикулярные оси симметрии) тепловые потоки в тонких металлических контактах незначительны по сравнению с осевыми (параллельными оси симметрии) тепловыми потоками. Рассчитаем эффективную теплопроводность электродов. Для расчетов рассмотрим одномерный случай (координата z). При этом тепловое сопротивление, создаваемое контактами керамика(позистор)-электрод ($P_{к1}$), электрод-керамика(изолятор) ($P_{к1}^* = P_{к1}$) и теплопроводностью электрода (P_λ), должно быть равно термическому сопротивлению (P_λ^*) электрода с эффективной теплопроводностью λ_1^* и идеальным тепловым контактом:

$$P_{к1} + P_\lambda + P_{к1} = P_{\lambda_1^*}. \quad (7)$$

Для случая теплового контакта позистора с корпусом через электрод и воздушный зазор следует использовать уравнение:

$$P_{\lambda_c} + P_\lambda + P_{к2} = P_{\lambda_2^*}, \quad (8)$$

где P_{λ_c} – тепловое сопротивление слоя воздуха (зазора) между позистором и электродом; $P_{к2}$ – контактное тепловое сопротивление электрод-корпус.

Тепловое сопротивление P_λ прослойки толщиной l материала связано с его теплопроводностью λ выражением:

$$P_\lambda = l/\lambda. \quad (9)$$

Согласно [5], контактное тепловое сопротивление, возникшее за счет соприкосновения поверхности материалов 1 и 2 с теплопроводностями λ_1 и λ_2 , описывается формулой:

$$P_k = 1/\left(\frac{\lambda_c Y}{2(h_1 + h_2)} + 8 \times 10^{-3} \lambda_m \left(\frac{pk}{3\sigma_b}\right)^{0.86}\right), \quad (10)$$

где $\lambda_m = 2 \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2)$; h_1 и h_2 – средние высоты микрошероховатостей контактирующих поверхностей; λ_c – теплопроводность среды (воздуха), заполняющей контактную зону; p – контактное давление; σ_b – предел прочности для более пластичного материала; Y – относительная величина зазора (3,33); $k = 15 \times 10^{-6} / (h_1 + h_2)$ для $(h_1 + h_2) \leq 10$ мкм.

При небольшом контактном давлении (менее 1МПа) вторым слагаемым в числителе уравнения (10) можно пренебречь. Примем, что теплопроводность воздуха (λ_c) постоянна и равна $2,6 \times 10^{-2}$ Вт/(м·К); что $(h_1 + h_2) = 10$ мкм для контакта керамика-электрод и $(h_1 + h_2) = 50$ мкм для контакта электрод-корпус. Тогда $P_{к1} = 2,3 \times 10^{-4}$ м²·К/Вт, $P_{к2} = 11,6 \times 10^{-4}$ м²·К/Вт. Используя формулы (7)–(9) находим тепловое сопротивление контакта керамика-электрод и электрод-корпус: $4,7 \times 10^{-4}$ м²·К/Вт и $127,0 \times 10^{-4}$ м²·К/Вт. Эффективная теплопроводность контакта между позистором и изолятором (λ_1^*) и между позистором и корпусом (λ_2^*) составляет 0,43 Вт/(м·К) и 0,0158 Вт/(м·К).

Результаты расчетов. Распределение температуры через 300 с после приложения напряжения 220В к одному из защитных позисторов приведено на рис. 2б. Динамика изменения средней температуры (теоретические и экспериментальные результаты) каждого элемента блока (защитных и сигнального позисторов) показана на рис. 3. Видно, что эксперимен-

тальные и расчетные данные хорошо согласуются во всем временном интервале.

Предложенная модель позволяет хорошо прогнозировать другие эксплуатационные характеристики рассматриваемых устройств. Время срабатывания защитного элемента не превышает 10 мс (при подаче 220 В). Рассчитанное значение остаточного тока в цепи составляло 4,2 мА (экспериментальное значение – $5 \pm 0,5$ мА). Ранее нами был проведен анализ работы терморезисторных блоков на основе модели с сосредоточенными параметрами [6]. Недостатком указанной модели являлась высокая погрешность оценок динамических характеристик (в режиме срабатывания). Модель, представленная в настоящей работе, хорошо описывает теплофизические процессы во всем временном интервале. Следовательно, рассмотренные выше подходы позволяют проводить оптимизацию параметров позисторов с высокой точностью для проектирования устройств защиты АТС с широким диапазоном рабочих токов (30–200 мА), а также прогнозировать выходные характеристики терморезисторных блоков различного функционального назначения.

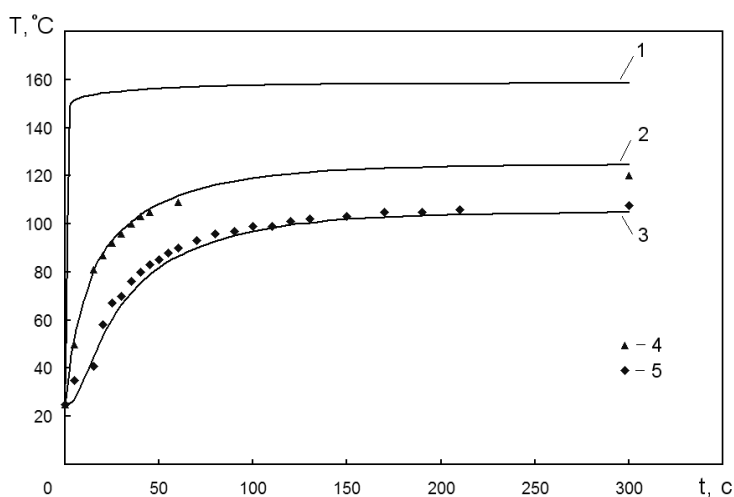


Рис. 3. Изменение средней температуры элементов позисторного блока [позистора защиты под электрическим напряжением (1 – расчет), позистора датчика (2 – расчет, 4 – эксперимент), неподключенного позистора защиты (3 – расчет, 5 – эксперимент)] после подачи на один защитный позистор напряжения 220 В.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Афанасьев, А.** Защита, основанная на знании / А. Афанасьев, А. Коншин, В. Прудинский // Мир связи. Соппест! – 2003. – № 5.
2. **Афанасьев, А.** Защита, основанная на знании / А. Афанасьев, А. Коншин, В. Прудинский // Мир связи. Соппест! – 2003. – № 6.
3. **Бобылев, М.Б.** Элемент токовой защиты электронных АТС / М.Б. Бобылев // Информост – Средства связи. – 2001. – № 3(16).
4. **Ильющенко, Д.А.** Позисторная керамика для элементов защиты линий электронной связи / Д.А. Ильющенко, С.В. Костомаров, В.Н. Шут // Материалы, технологии, инструменты. – 2001. – Т. 6, № 3. – С. 52–55.
5. **Платунов, Е.С.** Теплофизические измерения и приборы / Е.С. Платунов [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

6. **Шут, В.Н.** Позисторные блоки защиты автоматических телефонных станций / В.Н. Шут [и др.] // ИФЖ. – 2006. – Т. 79, № 5. – С. 88–93.

S U M M A R Y

Numerical model has been developed for the analysis of thermo physical properties of PTC thermistor blocks designed for overload and over-current protection. The model is based on the solution of thermal conductivity and electrical conductivity equations. It was shown that the results of numerical computation are in good agreement with experiment data. Developed approaches are useful for optimization of PTC thermistor properties and for prediction of output characteristics of thermistor blocks with various functionalities.

Поступила в редакцию 7.05.2009